



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552

พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูดที่ผลิตในประเทศไทย**ภายใต้การอัด การเฉือนและการดัด****BEHAVIORS AND PROPERTIES OF PULTRUDED FIBER REINFORCED PLASTIC****PRODUCED IN THAILAND UNDER COMPRESSION, SHEAR AND FLEXURE****หวังแก้ว บุญสวน (Whangkaew Boonsuan)¹****สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (Sittichai Seangatith)²****สงวน วงษ์ชาลิตกุล (Sanguan Vongchavalitkul)³**¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี whangkaew@ g.sut.ac.th²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sitichai@ g.sut.ac.th³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล sanguan@vu.ac.th

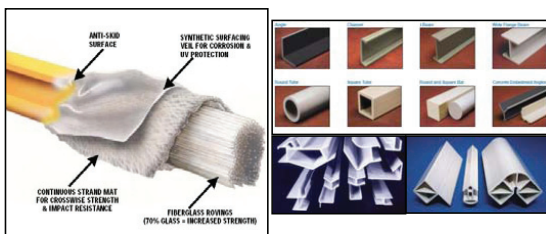
บทคัดย่อ : พลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูด (PFRP) เป็นวัสดุประกอบชนิดหนึ่งประกอบด้วยใยแก้วและเรซิน ผลิตโดยกระบวนการพัลทรูชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีอัตราส่วนของผลผลิตต่อต้นทุนสูง สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดหน้าตัดคงที่ ตรงและยาวต่อเนื่อง วัสดุ PFRP มีคุณสมบัติเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างทั่วไป คือ น้ำหนักเบา ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและสารเคมี สะดวกในการก่อสร้าง และสามารถผลิตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในแต่ละงานได้ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา PFRP ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างรูปแบบต่างๆ ในต่างประเทศ และจากการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีดังกล่าว วัสดุ PFRP ได้เริ่มมีการผลิตและใช้งานในโครงการก่อสร้างขนาดเล็กในประเทศไทยบ้างแล้ว แต่เนื่องจากวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุออกซิโธโทรปิกและมีสมบัติทางกลขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผลิตและเทคโนโลยีที่ผลิต ดังนั้น เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุ PFRP ที่พัฒนาขึ้นในประเทศในงานวิศวกรรมโยธาย่างเหมาะสม บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษาเชิงการทดลองของพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติพื้นฐานและทางกลของวัสดุ PFRP ที่ภายใต้การอัด การเฉือนและการดัด

ABSTRACT : Pultruded fiber reinforced plastic (PFRP) is a composite materials. It is made of glass fiber and resin and manufactured by a Pultrusion process. This process is one of the most popular processes used to produce the PFRP structural members. It offers the highest productivity-to-cost ratio and allows mass production of long, straight and constant sections. The PFRP has superior characteristics over the conventional materials such as light weight, high corrosion resistance, ease of handling in construction, and can be tailored to meet the requirements of a specific design. In the past few years, it has been used extensively in many constructions in many countries. Due to the adaptation of this technology, it has been manufactured and used in small construction projects in Thailand. Since the PFRP is an orthotropic material and its mechanical properties depend on the base materials and the production technology, therefore, in order to promote the utilization of this Thai-developed PFRP in civil engineering structures appropriately, this paper presents the experimental studies on the behaviors and the basic and mechanical properties of the PFRP under compression, shear and flexure.

KEYWORDS : Composite materials, Pultruded fiber reinforced plastic, Pultrusion process, Basic Properties, Mechanical properties

1. บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบพัลทูด (pultruded fiber reinforced plastic) หรือ FRP เป็นวัสดุประกอบ (composite materials) ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) แต่เมื่อพิจารณาแบบกลศาสตร์มหภาค (macromechanics) จะถือว่า FRP เป็นวัสดุเสมือนเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (quasi-homogenous) [7] มีคุณสมบัติทางกลแบบวัสดุออร์ทोटโรปิก (orthotropic) [2] และ [6] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา FRP ดังแสดงในภาพที่ 1 ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เนื่องจาก FRP มีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างทั่วไป ได้แก่ น้ำหนักเบา ด้านทานการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี ก่อสร้างง่ายและสามารถออกแบบและผลิตให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้ โดยการเลือกชนิดและปริมาณของวัสดุดิบและกำหนดทิศทางและการวางเส้นใย [2] วัสดุชนิดนี้ได้นำไปใช้ในพื้นที่ที่มีสิ่งแวดล้อมรุนแรง ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมเคมี หอทำความเย็น (cooling tower) โรงงานบำบัดน้ำเสีย โครงสร้างในทะเล โครงสร้างในพื้นที่ทุรกันดารเข้าถึงยาก เช่น สะพานและเสาไฟฟ้าในพื้นที่ภูเขาและในส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา [6]



ภาพที่ 1 ตัวอย่าง FRP ที่ใช้งานวิศวกรรมโยธาในต่างประเทศ

วิธีการผลิตแบบพัลทูด (pultrusion) เป็นวิธีการผลิตโดยการดึง วิธีนี้จะได้ชิ้นส่วนของ FRP ที่มีหน้าตัดคงที่สม่ำเสมอตรงและยาวต่อเนื่องในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กโครงสร้าง ขั้นตอนการผลิตโดยวิธีพัลทูดเริ่มจากดึงเส้นใยแก้ว (roving) ผ่านรางบังคับทิศทาง (guide plate) ลงสู่อ่างเรซิน (resin Impregnator) เพื่อทำให้เส้นใยแก้วอิ่มตัวด้วยเรซิน ใส่แผ่นวัสดุผิวนอก (surface veil) รวมเข้ากับเส้นใยแก้วที่อิ่มตัวเพื่อเพิ่มความเรียบของผิววัสดุ เพิ่มความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนและทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต แล้วนำเข้าสู่เครื่องรีด (preformer) เพื่อรีดตัวประสานส่วนเกินออก จากนั้นวัสดุจะถูกดึง (pulling system) เข้าสู่แม่พิมพ์แล้วบ่มด้วยแรงอัดและ

ความร้อนสูง (forming and curing die) อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะเริ่มจากต่ำในช่วงต้นแล้วสูงขึ้นและลดลงในช่วงปลาย สุดท้ายวัสดุจะถูกทำให้เย็นในอากาศแล้วถูกตัดตามความยาวที่ต้องการ (cut-off saw) [2] และ [6]

ประเทศไทยในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผลิต FRP จากต่างประเทศมาปรับแปลงและพัฒนา และได้ทำการผลิตขึ้นมาใช้งานบ้างแล้ว เช่น หน้าตัดทรงกลมตัน สี่เหลี่ยมตันและรูปตัวซี ซึ่งได้นำไปใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก แต่ยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก โดยมีสาเหตุหลักมาจากการขาดข้อมูลคุณสมบัติของ FRP ที่เหมาะสมและการขาดมาตรฐานการออกแบบที่ได้รับการยอมรับ ทำให้เจ้าของงานและวิศวกรยังมีความลังเลในการนำวัสดุนี้ไปใช้งานทั้ง ๆ ที่ FRP มีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างทั่วไปดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษาเชิงการทดลองของพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติพื้นฐานและทางกลของ FRP ที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเหินและการตัด ซึ่งผู้เขียนหวังว่าข้อมูลที่น่าเสนอนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยให้วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องได้เข้าใจในพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติพื้นฐานและทางกลของวัสดุ FRP ได้ดีขึ้น และช่วยกระตุ้นการใช้เทคโนโลยีที่ผลิตได้เองในประเทศให้มากขึ้นต่อไปในอนาคต

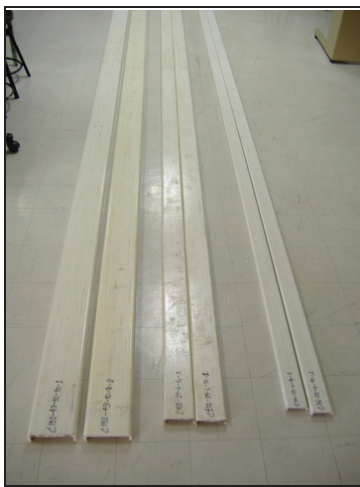
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการศึกษา

FRP ที่ใช้ในการศึกษานี้ผลิตจากเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester) และใยแก้วชนิด E-glass มีหน้าตัดรูปตัวซีและมีขนาดของหน้าตัดระบุ $76 \times 22 \times 6$, $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ มม. ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2 และตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากการตัดชิ้นส่วน (coupon) จากท่อน FRP ดังกล่าวตามที่มาตรฐานกำหนด โดยใช้เลื่อยกลความละเอียดสูงที่มีการลดความร้อนโดยการพ่นน้ำเพื่อป้องกันฝุ่นใยแก้วที่อาจเกิดจากการตัดเนื้อวัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิดการคันได้หากสัมผัสกับผิวหนังจำนวนมากและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุที่เกิดจากการตัดให้น้อยที่สุด เนื่องจาก FRP เป็นวัสดุประกอบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ PFRP

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุจะกระทำตามมาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1) การทดสอบองค์ประกอบหน้าตัด PFRP (constituent content) ตามมาตรฐาน ASTM D 3171 [4]
- 2) การทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D 792 [4]
- 3) การทดสอบการดูดซึมน้ำและความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 570 [4]

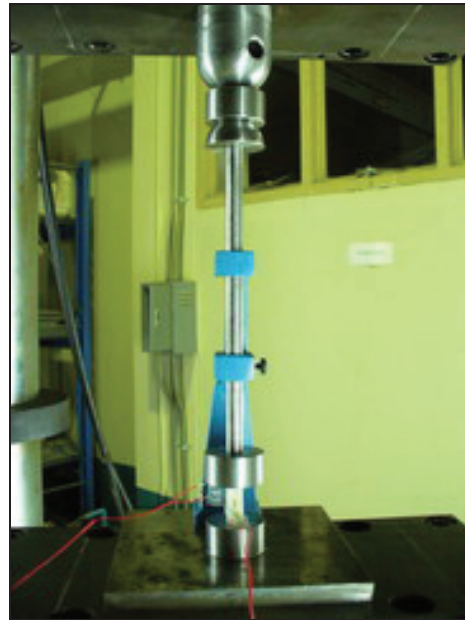


ภาพที่ 2 ลักษณะของ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในการศึกษา

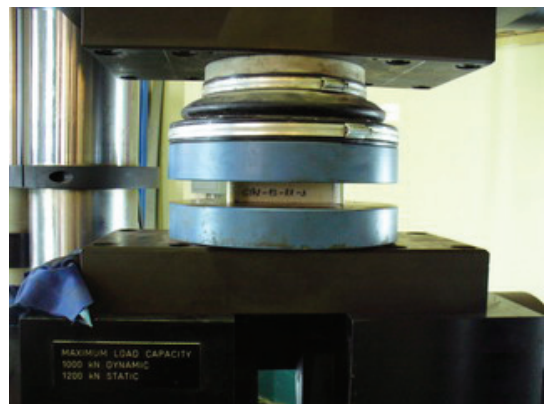
3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของ PFRP

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะกระทำตามมาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องและวิธีการที่เหมาะสมอื่น ๆ ดังนี้

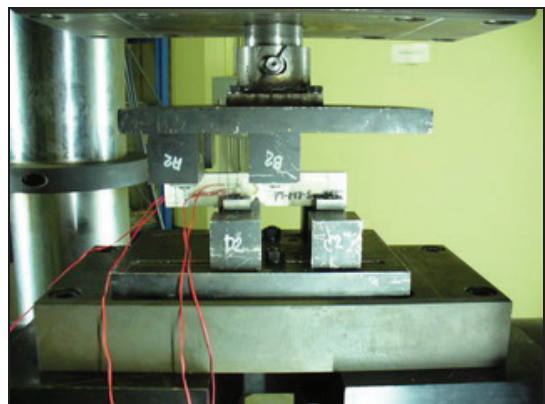
- 1) การทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนหรือแนวยาว (lengthwise, LW) และตามแนวขวาง (crosswise, CW) ตามมาตรฐาน ASTM D 695 [4] ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 3
- 2) การทดสอบกำลังอัดทั้งหน้าตัด (full section) ตามยาว ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 4
- 3) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสแรงเฉือนตามยาวตามมาตรฐาน ASTM D 5379 [4] และพัฒนาโดย Zureick and Steffen [9] ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 5
- 4) การทดสอบกำลังรับแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามยาวตามมาตรฐาน ASTM D 790 [4] ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด



ภาพที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดทั้งหน้าตัด



ภาพที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสแรงเฉือน



ภาพที่ 6 การทดสอบกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด

3.3 การวิเคราะห์การแจกแจงของผลการทดสอบ

การพล็อตความน่าจะเป็น (probability plot) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หารูปแบบของการแจกแจง (distribution) ของข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่จำนวนข้อมูลไม่มากนัก อีกทั้งสามารถระบุได้ว่ารูปแบบของการแจกแจงที่ได้มานั้นสามารถเข้ารูปสนิทได้กับข้อมูลที่มีอยู่เล็กน้อยเพียงใดทั้งในทางปริมาณ (quantitative) และในทางรูปแบบ (graphical picture) เมื่อวิเคราะห์ได้รูปแบบของการแจกแจงข้อมูลแล้ว สามารถทำการหาค่าพารามิเตอร์ประกอบของการแจกแจงของชุดข้อมูลนั้น ๆ ตามรูปแบบของการแจกแจงต่าง ๆ รวมถึงการหาค่าเชิงสถิติพื้นฐาน เช่น ค่าเฉลี่ย (mean, \bar{x}), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (coefficient of variation, COV) ในกรณีที่ปริมาณของข้อมูลมีเป็นจำนวนมากแล้ว ผลการวิเคราะห์หารูปแบบของการแจกแจงข้อมูลโดยวิธีนี้ก็จะมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น [8]

ในบทความนี้ การวิเคราะห์การแจกแจงได้ถูกทำโดยการพล็อตความน่าจะเป็นโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (least square fit) และใช้ค่า coefficient of determination (COD, r^2) ที่มีค่ามากที่สุดเป็นตัวชี้รูปแบบการแจกแจง ค่า COD ที่เข้าใกล้ 1 มากเพียงใดแสดงให้เห็นว่าการแจกแจงแบบนั้น ๆ เข้ากันได้กับข้อมูลที่มีอยู่ [8] โดยรูปแบบการแจกแจงที่ใช้มาทดสอบจะใช้รูปแบบที่มักนิยมใช้กันในงานทางด้านวิศวกรรมโยธาซึ่งมีทั้งหมด 6 รูปแบบ คือ normal distribution, lognormal distribution, exponential distribution, Weibull distribution, maximum extreme value distribution และ minimum extreme value distribution [1] มาเป็นรูปแบบในการวิเคราะห์การเข้ารูปสนิทของการแจกแจงของผลการทดสอบ

3.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ FRP

ในการศึกษานี้ คุณสมบัติของ FRP ที่ผลิตในประเทศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของ FRP ชนิด Structural Profiles 1500/1525 series ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา [6] และไม้ประดู่ซึ่งเป็นตัวอย่างไม้เนื้อแข็งที่มักถูกใช้งานในประเทศไทย ซึ่งข้อมูลที่ใช้มาจากมาตรฐานของกรมป่าไม้ [3]

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ FRP

จากตารางที่ 1 ซึ่งสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ FRP พบว่า ข้อมูลปริมาณใยแก้วใน FRP มีการแจกแจงแบบ normal distribution ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบสมมาตรรอบค่าเฉลี่ย ในส่วนของคุณสมบัติอื่น ๆ เป็นการแจกแจงแบบ lognormal distribution ซึ่งเป็นการแจกแจงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับแบบ normal distribution โดยรูปแบบการแจกแจงของคุณสมบัติพื้นฐานของ FRP ที่วิเคราะห์ได้มีระดับการเข้ากันได้กับข้อมูลที่สูง โดยมีค่า COD ที่ใกล้เคียง 1 ทุกคุณสมบัติ [8]

จากตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ FRP พบว่า

1) วัสดุ FRP ที่ใช้ในการศึกษามีอัตราส่วนใยแก้วต่อน้ำหนักที่ค่อนข้างสูงถึง 71.7% ซึ่งสูงกว่าค่าของ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. เล็กน้อย (2-16%) และในทำนองเดียวกันมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. เล็กน้อย (2-15%) เนื่องจากมีสัดส่วนของของเส้นใยแก้วมากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับไม้เนื้อแข็งพบว่า มีค่ามากกว่าความถ่วงจำเพาะของไม้เนื้อแข็งค่อนข้างมาก (58%)

2) วัสดุ FRP ที่ใช้ในการศึกษามีการดูดซึมน้ำสูงสุดมากกว่า FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. พอควร (19%) แสดงว่า FRP มีความพรุนของเนื้อวัสดุมากกว่าและมีแนวโน้มที่จะมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมและสารเคมีต่ำกว่า

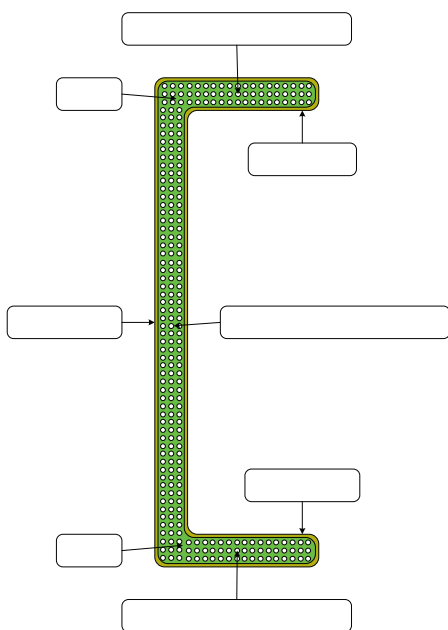
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของ FRP และการแจกแจง

คุณสมบัติ	จำนวนตัวอย่าง	การแจกแจง	COD (r^2)	\bar{x}	SD	COV (%)
ปริมาณใยแก้ว (% by wt.)	48	Normal	0.9491	71.7	4.04	5.6
ความหนาแน่น (kg/m ³)	48	Lognormal	0.9934	1958.6	65.87	3.4
ความถ่วงจำเพาะ	48	Lognormal	0.9934	1.96	0.07	3.6
การดูดซึมน้ำ (%)	36	Lognormal	0.9815	0.57	0.12	21.0

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของ FRP

คุณสมบัติ	คุณสมบัติพื้นฐานของ	
	FRP ผลิตโดย Creative Pultrusion, Inc.	ไม้เนื้อแข็ง (ไม้ประดู่)
ปริมาณใยแก้ว (% by wt.)	อยู่ในช่วง 60-70 %	---
ความถ่วงจำเพาะ	1.66-1.93	0.82
การดูดซึมน้ำสูงสุด (max 0.74%)	0.6%	---

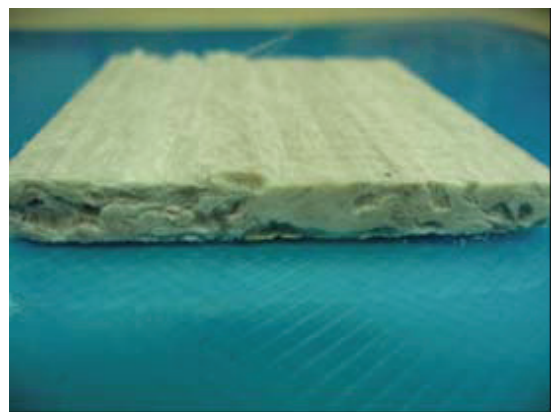
3) จากการทดสอบองค์ประกอบหน้าตัด FRP พบว่า FRP มีการเสริมเส้นใยแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแก้วตามความหนาของชิ้นส่วนตัวอย่างเป็นแบบสมมาตร (symmetry) โดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้นใหญ่ ๆ จากด้านบนหรือด้านล่างของกึ่งกลางความหนา คือ ชั้นนอกสุดเป็นเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุผิวนอก (surface veil) เป็นแผ่นเส้นใยสานแบบต่อเนื่อง (continuous filament mat) ดังแสดงในภาพที่ 8 และชั้นในสุดเป็นกลุ่มเส้นใยแก้วยาวต่อเนื่องเรียงตัวตามยาวของชิ้นส่วน (continuous strand) ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งการจัดเรียงเส้นใยแก้วในลักษณะนี้จะช่วยให้ FRP มีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดในแนวแกน (LW) ได้สูงขึ้น แดรับแรงดึงและแรงอัดในแนวขวาง (CW) ไม่สูงและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติแบบเปราะเนื่องจากการวิบัติของ FRP ถูกกำหนดโดยการวิบัติของใยแก้วเป็นหลัก



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของหน้าตัด FRP



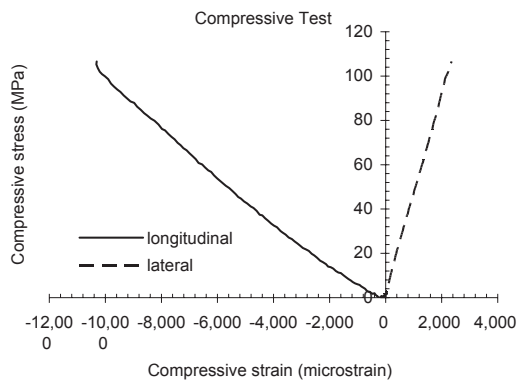
ภาพที่ 8 วัสดุผิวนอก



ภาพที่ 9 การวางตัวของกลุ่มเส้นใยแก้วยาวต่อเนื่อง

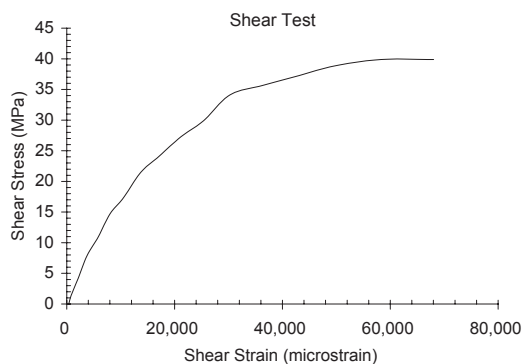
4.2 คุณสมบัติทางกลของ FRP

ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด จากภาพพบว่าพฤติกรรมของวัสดุ FRP เป็นวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลัน (brittle fracture failure) ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการทดสอบที่ได้ใน [2] และ [9] โดยมีความเครียดที่จุดวิบัติเฉลี่ยประมาณ $10,500 \mu\epsilon$ ซึ่งใกล้เคียงกับของไม้เนื้อแข็งภายใต้แรงอัดในแนวนานสั้น ทั้งนี้สาเหตุหลักที่เป็นเช่นนี้เกิดจากการที่ FRP มีการเสริมด้วยเส้นใยแก้วแบบ กลุ่มเส้นใยแก้วยาวต่อเนื่องในแนวแกน เมื่อเส้นใยแก้วเกิดการวิบัติภายใต้แรงกระทำแล้ว FRP ก็จะเกิดการวิบัติพร้อมกันไปด้วย



ภาพที่ 9 ตัวอย่างแผนภาพหน่วยแรงและความเครียดอัด

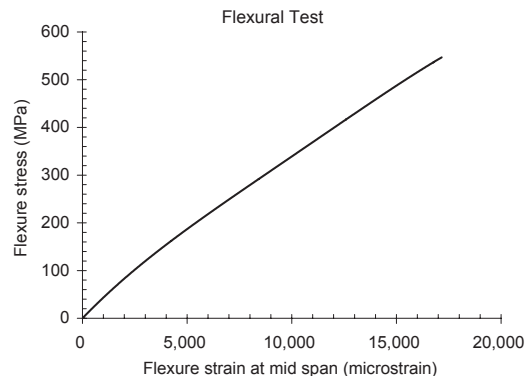
ภาพที่ 10 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเฉือน จากภาพพบว่า วัสดุ FRP มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงในช่วงแรก โดยมีหน่วยแรงเฉือนปฏิกิริยา (proportional limit) ประมาณ 30% ของหน่วยแรงเฉือนประลัย จากนั้น เนื่องจากการเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (microcracking) ขึ้นในวัสดุ พฤติกรรมของวัสดุ FRP จึงเปลี่ยนเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติ โดยมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive Failure) ที่ความเครียดเฉือนประลัยที่สูงมากคือ สูงกว่า $65,000 \mu\epsilon$ ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการทดสอบที่ได้ใน [9]



ภาพที่ 10 ตัวอย่างแผนภาพหน่วยแรงและความเครียดเฉือน

ภาพที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดดัด ซึ่งพบว่า พฤติกรรมของวัสดุ FRP เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติเช่นเดียวกับภายใต้แรงอัด แต่มีความเครียดที่จุดวิบัติและหน่วยแรงดัดประลัย (modulus of rupture)

ประมาณ $17,000 \mu\epsilon$ และ 589 MPa ซึ่งสูงกว่าในกรณีของแรงอัดและของไม้เนื้อแข็ง



ภาพที่ 11 ตัวอย่างแผนภาพหน่วยแรงและความเครียดดัด

จากตารางที่ 3 ซึ่งสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของ FRP พบว่า รูปแบบการแจกแจงของคุณสมบัติทางกลของ FRP ที่วิเคราะห์ได้มีระดับการเข้ากันได้กับข้อมูลที่สูง โดยมีค่า COD ที่ใกล้เคียง 1 ทุกคุณสมบัติ [8] โดยที่ค่าลึงรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนหรือแนวยาว (LW) และค่าลึงรับแรงอัดประลัยทั้งหน้าตัด LW มีการแจกแจงแบบ lognormal distribution ในส่วนของค่าลึงรับแรงอัดประลัยตามแนวขวาง (CW) มีการแจกแจงแบบ minimum extreme value distribution และค่าลึงรับแรงเฉือนประลัย LW มีการแจกแจงแบบ maximum extreme value distribution ซึ่งเป็นการแจกแจงที่มีข้อมูลที่มีค่าต่ำและสูงเป็นส่วนใหญ่ตามลำดับ ในส่วนของค่าลึงรับแรงดัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด LW มีการแจกแจงแบบ normal distribution อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการแจกแจงของผลการทดสอบค่าลึงรับแรงเฉือนประลัย LW และค่าลึงรับแรงอัดประลัย LW ที่ได้กับข้อมูลในเอกสารอ้างอิง [9] พบว่ามีความแตกต่างกัน โดย [9] พบว่า คุณสมบัติดังกล่าวมีแจกแจงแบบ Weibull distribution ซึ่งข้อมูลการแจกแจงที่กล่าวถึงนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางกลของ FRP ที่มีความน่าเชื่อถือต่อการนำไปใช้งาน รวมไปถึงการวิเคราะห์หาตัวคูณความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงสร้างต่อไป

ในส่วนของคุณสมบัติทางกลพบว่า คุณสมบัติทางกลตามแนวแกน LW มีค่ามากกว่าคุณสมบัติทางกลตามแนวขวาง CW แสดงว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุชนิดนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของใยแก้วซึ่งมีปริมาณมากในทิศทาง LW ซึ่งเป็นลักษณะ

อย่างหนึ่งของวัสดุออลิโธโรปิก นอกจากนั้นแล้ว กำลังอัด
 ประลัยทั้งหน้าตัด LW มีค่ามากกว่ากำลังอัดประลัย LW ของชิ้น
 ตัวอย่างที่ตัดมาเล็กน้อย โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากการรบกวน
 ชิ้นส่วนตัวอย่างเนื่องจากการคั่นน้อยกว่า เมื่อพิจารณาค่า COV
 พบว่า ผลการทดสอบส่วนใหญ่มี COV ก่อนข้างสูงแสดงว่า
 PFRP มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ ซึ่งควรจะต้องมีการปรับปรุง
 เทคโนโลยีและขบวนการผลิต PFRP อย่างต่อเนื่องต่อไป

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของ PFRP และการแจกแจง

คุณสมบัติ	จำนวน ตัวอย่าง	การ แจกแจง	COD (r^2)	\bar{x}	SD	COV (%)
กำลังอัดประลัย LW (MPa)	30	Lognormal	0.9751	190.8	43.87	23.08
โมดูลัสเชิงอัด LW (GPa)	14	---	---	33.45	---	---
กำลังอัดประลัย CW (MPa)	20	Min. Ext.	0.9662	28.3	4.32	15.28
โมดูลัสเชิงอัด CW (GPa)	9	---	---	4.35	---	---
กำลังอัดประลัยทั้งหน้าตัด LW (MPa)	29	Lognormal	0.9766	218.6	56.79	25.98
กำลังเฉือนประลัย LW (MPa)	12	Max. Ext.	0.9645	37.1	18.55	37.13
โมดูลัสแรงเฉือน LW (GPa)	8	---	---	2.25	---	---
กำลังคดประลัย LW (MPa)	18	Normal	0.9780	589.1	98.49	16.71
โมดูลัสเชิงคด LW (GPa)	18	Normal	0.9552	31.1	3.72	11.97

จากตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลกับ PFRP
 ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. พบว่ากำลังอัดประลัย LW,
 CW, กำลังอัดทั้งหน้าตัด LW และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด CW
 ของPFRP มีค่าน้อยกว่า แต่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด LW มีค่า
 มากกว่าเนื่องจากการรับแรงอัด LW ไยแก้วจะเป็นตัวรับแรง
 หลัก ปริมาณใยแก้วที่มากกว่าของ PFRP ที่ใช้ในการศึกษาทำให้
 ความแกร่ง (stiffness) สูง แต่เนื่องจากเรซินที่ใช้ไม่สามารถยึดรั้ง
 การโก่งเคาะของใยแก้วไว้ได้ ดังนั้น กำลังอัดประลัยจึงมีค่า
 ก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงคดประลัย นอกจากนั้นแล้ว
 กำลังรับแรงเฉือนประลัยและโมดูลัสแรงเฉือน LW ที่ทดสอบได้
 ก็มีค่าน้อยกว่า PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. โดย
 น่าจะมีสาเหตุมาจากรเรซินที่ใช้มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุประสาน
 (matrix) ที่ไม่ดี ทำให้ไม่สามารถยึดรั้งใยแก้วให้ทำงานร่วมกันได้
 ซึ่งสังเกตเห็นได้จากการวิบัติของ PFRP ที่เริ่มที่เรซินก่อน

อย่างไรก็ตาม กำลังคดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคด LW
 ที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่า PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion,
 Inc. เนื่องจาก PFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาณใยแก้วมากและ

การคดจะใช้ใยแก้วเป็นตัวรับแรงหลัก เห็นได้จากการวิบัติที่เริ่ม
 จากระซินในด้านบนของตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นพื้นที่รับแรงอัด
 ก่อนด้านล่างซึ่งเป็นพื้นที่รับแรงดึง

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลกับไม้ประดู่ซึ่งเป็นไม้เนื้อ
 แข็ง พบว่าคุณสมบัติทางกลที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่าไม้ทุก ๆ
 กรณี โดยมีอัตราส่วนของกำลังอัดประลัย LW ต่อน้ำหนักของ
 PFRP สูงกว่าไม้ 64.6% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PFRP มีประสิทธิภาพ
 ในการรับแรงอัดต่อน้ำหนักสูงกว่าไม้มาก

ขอให้สังเกตด้วยว่า การที่ PFRP มีกำลังคดประลัยที่ค่อนข้าง
 สูงแต่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การแอ่นตัว
 ของคานอาจจะเป็ปัจจัยหลักในการควบคุมการออกแบบคาน
 PFRP ที่มีความยาวช่วง (span) มาก นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่า
 PFRP มีกำลังรับแรงเฉือนประลัยต่ำกว่ากำลังรับแรงคดประลัย
 ประมาณ 16 เท่า ดังนั้น หน่วยแรงเฉือนอาจจะเป็ปัจจัยหลักใน
 การกำหนดกำลังรับแรงของคาน PFRP ที่มีความยาวช่วง
 ก่อนข้างสั้น

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของ PFRP

คุณสมบัติ	คุณสมบัติทางกลของ	
	PFRP ผลิตโดย Creative Pultrusion, Inc.	ไม้เนื้อแข็ง (ไม้ประดู่)
กำลังอัดประลัย LW	< 15.9%	> 3.0 เท่า (σ_{PL})
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด LW	> 62.4%	> 1.7 เท่า
กำลังอัดประลัย CW	< 3.0 เท่า	> 43.4% (σ_{PL})
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด CW	< 37.0%	---
กำลังอัดประลัยทั้งหน้าตัด LW	< 3.7%	> 3.5 เท่า (σ_{PL})
กำลังเฉือนประลัย LW	< 23.1%	> 1.3 เท่า
โมดูลัสแรงเฉือน LW	< 22.4%	---
กำลังคดประลัย LW	> 1.6 เท่า	> 4.2 เท่า (σ_{PL})
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคด LW	> 1.8 เท่า	> 1.5 เท่า
อัตราส่วนกำลังอัด LW ต่อน้ำหนัก	---	> 64.6%

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวัสดุ PFRP ที่ผลิตขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี
 พัลทรูชันจากต่างประเทศ พบว่า

1) วัสดุ PFRP ที่ใช้ในการศึกษานี้มีคุณสมบัติพื้นฐานและ
 พฤติกรรมการรับแรงกระทำใกล้เคียงกับ PFRP ของบริษัท
 Creative Pultrusion, Inc. โดยมีกำลังรับแรงคดประลัยและ
 โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดที่สูงกว่าของ PFRP ของบริษัท Creative

Pultrusion, Inc. แต่มีความแตกต่างเป็นอย่างมากในส่วนของคุณสมบัติการวิบัติภายใต้แรงอัดที่มีความเปราะมากกว่าข้อมูลที่น่าเสนอใน [3] และ [9] และมีคุณสมบัติทางกลภายใต้แรงอัดและแรงเฉือนที่ต่ำกว่า

2) ผลการทดสอบส่วนใหญ่มี COV ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงว่า PFRP มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสาเหตุหลัก คือ การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีจากต่างประเทศที่ยังต้องการการพัฒนาต่อไป และการที่ใช้เรซินและใยแก้วที่มีคุณสมบัติต่ำ เพื่อลดราคาของวัสดุ PFRP ลง ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงการผลิตในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุและขบวนการผลิต ควรเพิ่มคุณภาพเรซินและเพิ่มแผ่นใยแก้วต่อเนื่องเพื่อช่วยรับแรงตามแนวขวาง

3) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติของ PFRP กับไม้เนื้อแข็ง พบว่า PFRP มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าไม้ แต่มีคุณสมบัติทางกลภายใต้การอัด การเฉือนและการดัดดีกว่าไม้เนื้อแข็ง ซึ่งสามารถนำวัสดุ PFRP นี้ไปใช้ในโครงสร้างเพื่อทดแทนการใช้ไม้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะช่วยในการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและรักษาสภาพแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สวงน วงษ์ชาติกุล, หวังแก้ว บุญสวน และ เฉลิมชัย พาวัฒนา (2545). การวิเคราะห์การเข้ารูปสนิมของค้ำสั้งไม้เนื้ออ่อน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม 2545. ขอนแก่น.
- [2] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2542). คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุใยแก้วเสริมพลาสติก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5 (เล่มที่ 1, หน้า MAT-202-MAT-207), 24-26 มีนาคม 2542. ชลบุรี.
- [3] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2549). เอกสารคำสอนวิชาทดสอบวัสดุ. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] American Society for Testing and Materials. (2005). *Annual book of ASTM standard*. Vol.1.02, 7.01, 7.02, 8.01, 8.02 and 15.03. PA.
- [5] Bank, L. C. (2006). *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. Hoboken, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [6] Creative Pultrusion, Inc. (2000). *The new and improved Pultex Pultrusion global design manual of standard and custom fiber reinforced polymer structural profiles*. (Volume 3 – Revision 3 Metric Version). Alum Bank, PA.
- [7] Kollar, L. P., and Springer, S.S. (2003). *Mechanics of composite structures*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK.
- [8] Lewis, E. E. (1994). *Introduction to Reliability Engineering*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York.
- [9] Zureick, A., and Steffen, R. (2000). Behavior and design of concentrically loaded Pultruded angle struts. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126 (3): 406-416.